

М. А. РУДЕНКО, Ю. В. ЗАЧЕПА**ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА У ПУСКОВОМУ РЕЖИМІ З ЖИВЛЕННЯМ ВІД ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ**

В роботі розглянуто питання ідентифікації електромагнітних параметрів загальнопромислових асинхронних двигунів, що працюють здебільшого в повторно-кратковчасних та коротковчасних режимах роботи. Запропоновано спосіб ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронних двигунів під час пуску на основі енергетичного методу. Розроблено схемне рішення реалізації запропонованого способу ідентифікації з живленням досліджуваного асинхронного двигуна від електромеханічного накопичувача енергії. Для підвищення точності ідентифікації запропонований підхід, що враховує ефект витіснення струму в роторі, у вигляді залежності активного опору ротора від струму.

Ключевые слова: ідентифікація параметрів, енергетичний метод, миттєва потужність, ефект витіснення струму в роторі.

Н. А. РУДЕНКО, Ю. В. ЗАЧЕПА**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ В ПУСКОВОМ РЕЖИМЕ С ПИТАНИЕМ ОТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ**

В работе рассмотрены вопросы идентификации электромагнитных параметров общепромышленных асинхронных двигателей, работающих в основном в повторно-кратковременных и кратковременных режимах работы. Предложен способ идентификации электромагнитных параметров асинхронных двигателей при пуске на основе энергетического метода. Разработано схемное решение реализации предлагаемого способа идентификации при питании исследуемого асинхронного двигателя от электромеханического накопителя энергии. Для повышения точности идентификации предложен подход, учитывающий эффект вытеснения тока в роторе, в виде зависимости активного сопротивления ротора от тока.

Ключові слова: ідентифікація параметрів, енергетичний метод, миттєва потужність, ефект витіснення струму в роторі.

N. A. RUDENKO, Y. V. ZACHEPA**IDENTIFICATION OF NONLINEAR PARAMETERS OF INDUCTION MOTOR IN THE START-UP POWERED SUPPLIED FROM ELECTROMECHANICAL ENERGY STORAGE DEVICE**

The paper deals with the identification of electromagnetic parameters of general industrial induction motors operating mainly in intermittent and short-term operating modes. The paper proposes a method for identification of electromagnetic parameters of induction motors which based on the energy method when powered by electromechanical energy storage devices. Developed schematic implementation of the proposed method for identification of parameters with formation of the required levels of energy effects when powering investigated induction motor from electromechanical energy storage device. To improve the accuracy of identification of electromagnetic parameters of induction motors during start-up, an approach is proposed that takes into account the effect of current displacement in the rotor, in form of dependence of rotor resistance on current. It has been experimentally proven that the proposed approach allows with sufficient accuracy to identify the electromagnetic parameters of induction motor. Studies installed expediency identification of EMP of IM with taking into account effect of current displacement when supplying by decaying signal of DC voltage on the stator winding and followed harmonic analysis of the current and voltage, determining an actual value of the rotor's resistance.

Keywords: induction motor, energy method, instant power, current displacement effect in the rotor.

Введення. На сьогодні асинхронні двигуни (АД) широко застосовуються в різних галузях промисловості. Це пов'язано з тим, що АД прості в обслуговуванні, мають низьку вартість, високий коефіцієнт корисної дії та високу надійність. Однак АД періодично виходять з ладу і проходять ремонті операції для відновлення працездатності. Після проведення ремонту електромагнітні параметри (ЕМП) АД можуть відрізнятися від початкових [1], закладених заводом-виробником, що вимагає їх точного визначення перед поверненням в попередній технологічний процес.

Аналіз стану питання. На даний час створено багато методів і способів ідентифікації ЕМП АД. Однак у зв'язку зі збільшенням вимог до випуску продукції, реалізації енергоефективних програм і розширенні функціональних можливостей електротехнічного обладнання існує необхідність в модернізації існуючих і розробці нових методів ідентифікації, які враховують нелінійність, властиві визначенням параметрам двигуна для відповідних режимів роботи.

Інформація про нелінійні параметри АД дозволить як на етапі проектування нових електричних машин, так для машин, що працюють тривалий термін і/або які пройшли ремонт, правильно налаштувати системи управління технологічними процесами, що забезпечують задані показники, наприклад, максимальний пусковий момент, максимальну перевантажувальну здатність, мінімальну робочу температуру при заданому навантаженні і т.д.

Одним з методів ідентифікації параметрів АД, математичний апарат якого дозволяє враховувати різного роду фізичні процеси і явища, які значно впливають на ЕМП АД, у вигляді нелінійностей в схемі заміщення є енергетичний метод [2]. До таких фізичних явищ відносяться втрати в сталі, нелінійність кривої намагнічування, ефект насичення сталі, поверхневий ефект. Слід враховувати той факт, що нелінійності в АД проявляються при істотних енергетичних впливах на електричну машину. В якості енергетичних впливів використовується напруга, струм і потужність [3].

© М. А. Руденко, Ю. В. Зачепа, 2019

Тобто в результаті завдання відповідних енергетичних впливів, можна отримати різні відгуки на зміну параметрів АД. Зміна енергетичних впливів дозволяє визначати електромагнітні параметри двигуна з нелінійностями, а в подальшому виконати ідентифікацію параметрів і самих нелінійностей.

Окремої уваги заслуговують нелінійності, які пов'язані з ефектом витіснення струму в роторі [4, 5], так як він призводить до зміни опору ротора при пуску двигуна.

Явище витіснення струму при пуску і пов'язане з цим збільшення активного і зменшення індуктивного опорів зустрічається також і у двигунів з короткозамкненим ротором загальнопромислового виконання [6]. Для підсилення ефекту витіснення струму в короткозамкнених АД потужністю до 100 кВт, пазам ротора і стержням надають спеціальну, сильно витягнуту в радіальному напрямку форму.

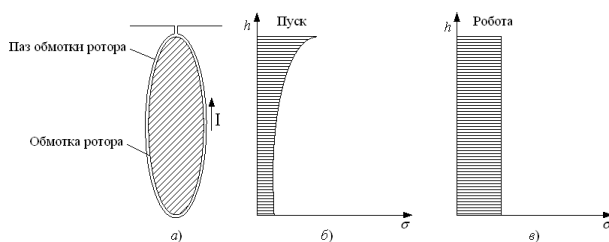


Рис. 1. Розподіл струму в провіднику ротора: а – розріз паза ротора загальнопромислового АД з радіально витягнутими стержнями, б – розподіл щільності струму σ по висоті h в клітці під час пуску, в – розподіл щільності струму в номінальному режимі роботи двигуна.

Найбільшого поширення загальнопромислові АД з використанням ефекту витіснення струму отримали в механізмах механічних молотів і гільйотинних ножиць. Дані механізми застосовуються для виготовлення великої кількості виробів при масовому виробництві. Механічні молоти і гільйотинні ножиці працюють в умовах різко-змінного ударного навантаження, коли пікові моменти (при ударі) чергуються з моментами холостого ходу (при паузах). Електродвигуни ковальсько-пресових машин (КПМ) та гільйотинних ножиць працюють в тривалому, повторно-короткочасному і короткочасному режимах роботи. Основною характеристикою електроприводу ковальсько-пресових машин і гільйотинних ножиць є значення пускового моменту, який в свою чергу визначається електромеханічними параметрами двигуна, тому стає питання про ідентифікацію ЕМП загальнопромислових АД не тільки в сталих але і в перехідних режимах роботи.

Найбільш повно зазначеним режимам роботи відповідають наступні двигуни:

– серії 4АС – це АД з короткозамкненим ротором підвищеного ковзання (від 4 до 14%), тривалого або повторно-короткочасного режиму (ПВ = 40%) потужністю від 0,4 до 63 кВт, закритого виконання з обдуванням;

– серії 2П – це двигуни постійного струму, що охоплюють висоти осей обертання від 90 до 315 мм і діапазон потужностей від 0,37 до 200 кВт. Машины ці-

єї серії призначені для роботи в широко регульованих електроприводах. Вони замінюють машини серії П, а також спеціалізовані машини серій ПС (Т), ПБС (Т), ПР.

Основними принципами управління КПМ і гільйотинних ножиць є:

- виконання заданого режиму руху основного робочого органу, при цьому повинні забезпечуватися продуктивність машини і якість виробу, а саме це забезпечує необхідне значення пускового моменту;
- точна взаємодія повзуна з допоміжними механізмами;
- безпека роботи оператора.

Але необхідно відзначити, що розрахунок механічних характеристик АД за каталожними даними з використанням класичних залежностей для моменту двигуна [7-9], показує, що спостерігається значна похибка під час визначення пускового моменту електричної машини. Дана похибка проявляється в тому, що значення розрахованого пускового моменту не відповідає каталожному [8-10].

Для АД 4АС132М8 номінальною потужністю 6 кВт були розраховані пускові моменти [7] згідно з наступними виразами:

$$M_n = 3 U_1^2 \frac{R_2}{s} / \left[\omega_0 \left((R_1 + R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right) \right]; \quad (1)$$

$$M_n = 2 M_k / \left(s/s_k + s_k/s \right); \quad (2)$$

$$M_n = 2 M_k \left(1 + \frac{R_1}{R_2/s} s_k \right) / \left[\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 \frac{R_1}{R_2/s} s_k \right]; \quad (3)$$

$$M_n = P_b / \omega_0, \quad (4)$$

де U_1 – напруга статора; R_1 , R_2 – активні опори статора і ротора відповідно; X_1 , X_2 – індуктивні опори статора і ротора відповідно; S – ковзання; ω_0 – частота обертання магнітного поля; M_k – момент критичний; s_k – критичне ковзання.

Так згідно наведених вище формул: (1) – пусковий момент згідно механічної характеристики; (2) – пусковий момент згідно з формулою Клосса; (3) – пусковий момент згідно з уточненою формулою Клосса; (4) – пусковий момент на валу.

Аналіз отриманих пускових моментів показав, що значення розрахункових моментів відповідно до рівняння механічної характеристики (M_{n1}), формулі Клосса (M_{n2}) та уточненої формули Клосса (M_{n3}), а також формулі моменту на валу (M_{n4}) не відповідає каталожному ($M_k = k_n M_n$, де k_n – кратність пускового моменту згідно каталожним даним [8-10]; M_n – номінальний момент двигуна), визначеного шляхом механічного навантаження, що представлено в табл. 1. Також було отримано процентне співвідношення між розрахунковими пусковими моментами до каталожного $\Delta M_n = (M_{nk} - M_n) / M_{nk} \cdot 100\%$ (табл. 1).

Згідно з результатами, представленими в табл. 1 видно, що розрахункові величини пускових моментів менші від величини пускового моменту, отриманого з даних паспорту.

Таблиця 1 – Значення пускових моментів асинхронних двигунів

Каталожні дані		
Момент номінальний M_n , Н·м		82,44
Кратність пускового моменту $\lambda_{п} = M_{пк} / M_n$		1,8
Кратність моменту критичного $\lambda_k = M_k / M_n$		2
Значення пускового моменту $M_{пк}$, Нм		148,392
Розрахункові дані		
Пусковий момент $M_{п}$, Н·м	відповідно до виразу 1	127,755
	відповідно до виразу 2	83,602
	відповідно до виразу 3	90,084
	відповідно до виразу 4	100,711
Відносна похибка визначення пускового моменту $\Delta M_{п}$, %	для виразу 1	13,9
	для виразу 2	43,66
	для виразу 3	39,29
	для виразу 4	32,13

Розбіжність в розрахунках моментів пов'язано зі збільшенням активного опору ротора під дією ефекту витіснення струму, що призводить до підвищення пускового моменту. Це також пояснюється тим, що в паспортних даних наводяться значення параметрів АД, які визначалися на робочій ділянці механічної характеристики і, відповідно, вплив ефекту витіснення в цьому випадку практично не позначається на значенні самих параметрів. В той же час саме в пускових режимах дія ефекту витіснення струму на опір ротора максимальна і це необхідно враховувати для електричних машин, що здебільшого працюють саме в перехідних режимах, зокрема пуску/гальмуванні. Тому для визначення нового паспорта АД, що пройшов ремонт, необхідно проводити випробування і після ремонту для режимів, максимально наближених до реальних умов експлуатації.

Мета роботи. Розробка способу ідентифікації ЕМП АД в пускових режимах роботи з урахуванням нелінійності параметрів у зв'язку з максимальним ефектом витіснення струму у роторі.

Матеріал і результати досліджень. Відомо, що ефект витіснення струму проявляється в пусковому режимі роботи двигуна. Тому для ідентифікації нелінійностей в ЕМП АД з урахуванням цього ефекту необхідно реалізувати енергетичні впливи на досліджуваній машині, що еквівалентні такому режиму роботи електричної машини. Забезпечення належного рівня струму передбачає використання в якості джерела живлення накопичувачів енергії:

- ємнісних накопичувачів;
- електромеханічних накопичувачів.

Наявність того чи іншого типу накопичувачів дозволяє отримати перехідні процеси у вигляді загасаючих сигналів струму і напруги, необхідних для точного визначення ЕМП АД з урахуванням впливу ефекту витіснення струму на кожному проміжку часу.

Однак слід враховувати те, що застосування ємнісних накопичувачів за техніко-економічними показниками дещо обмежено. Це пояснюється тим, що необхідна конденсаторна батарея повинна відповідати рівню номінальної напруги АД, а в разі ідентифікації параметрів двигунів великої потужності вартість таких батарей і їх габаритні розміри будуть значні. Тому для практичного застосування більше підходять більш поширені електромеханічні накопичувачі енергії, наприклад, двигуни постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ), що забезпечують постійну частоту обертання. Блок-схема для реалізації запропонованого способу ідентифікації ЕМП АД представлена на рис. 2. Для вимірювання миттєвих значень необхідних енергетичних впливів використовується вимірю-

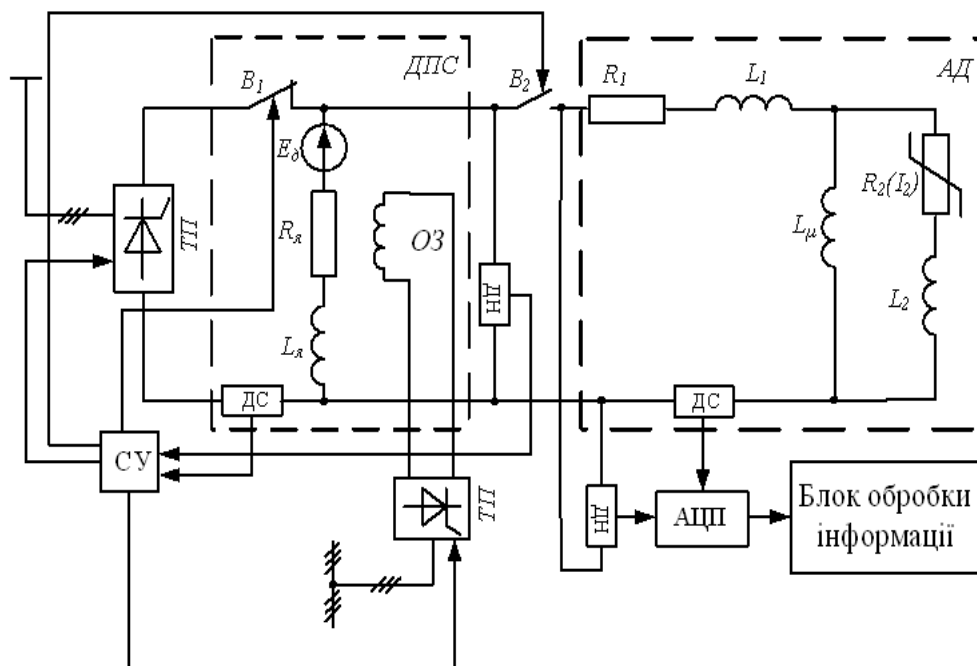


Рис. 2. Блок-схема системи ідентифікації ЕМП АД з живленням від ДПС НЗ

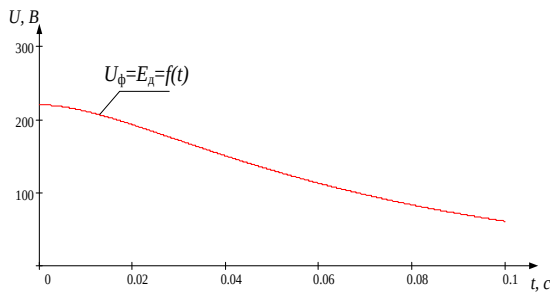


Рис. 3. Перехідний процес в одній фазі статора АД з живленням ДПС НЗ за напругою

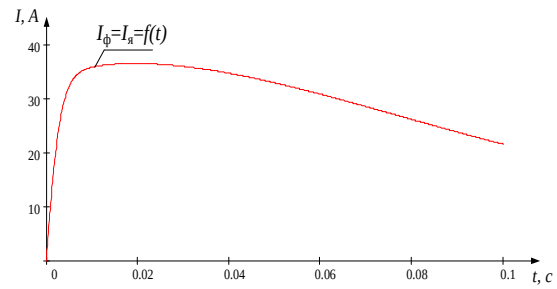


Рис. 4. Перехідний процес в одній фазі статора АД з живленням ДПС НЗ за струмом

вальний модуль, який містить блок датчиків напруги (ДН) і струму (ДС), аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і блок обробки інформації, що представляє собою персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Принцип роботи системи (рис. 2) наступний. Спочатку запускається ДПС з живленням від зовнішнього джерела енергії, наприклад, від стаціонарної мережі за допомогою тиристорного перетворювача (ТП). Далі, після досягнення необхідного значення електрорушійної сили E_d ДПТ, відбувається перекомутація ланок живлення за допомогою керуючого сигналу від блоку системи управління (СУ) – розмикається вимикач B_1 і замикається вимикач B_2 – ДПТ переводиться в режим динамічного гальмування, а фаза статора ідентифікованого АД отримує живлення у вигляді затухаючого сигналу напруги необхідної амплітуди. Сигнали напруги (рис. 3) та струму (рис. 4) розглядаються на інтервалах часу тривалістю в 0,01 с кожен. При цьому інтервал від 0 до 0,01 с відповідає першій ділянці, від 0,01 до 0,02 с – другій і т.д.

У процесі ідентифікації ЕМП АД встановлено, що активний опір ротора має нелінійний характер зміни через вплив ефекту витіснення струму і може бути апроксимований поліномом парних ступенів виду [2]:

$$R_2(I_2) = R_{20} + k_{R_2} I_2^2 + k_{R_4} I_2^4 + \dots + k_{R_d} I_2^d, \quad (5)$$

де R_{20} – активний опір ротора без врахування зміни через ефект витіснення; I_2 – струм ротора; k_{Rd} – коефіцієнти апроксимації кривої зміни активного опору ротора під дією ефекту витіснення струму.

Для кривої зміни активного опору під дією ефекту витіснення струму, побудованої за отриманими коефіцієнтами апроксимації, квадратична похибка апроксимації відносно кривої зміни активного опору ротора, наведеної в [7], склала $5,9 \cdot 10^{-3}$.

Для спрощення математичного апарату вираз виду (5) з достатньою точністю може бути апроксимувати поліномом другого ступеня. Тоді миттєва потужність на нелінійному активному опорі ротора буде мати наступний вигляд:

$$p_{R_2}(t) = i_2^2 R_2(i(t)) = i_2^2(t) (R_{20} + k_{R_2} (i(t))^2). \quad (6)$$

Для ідентифікації ЕМП АД пропонується використовувати енергетичний метод [2], так як наявність зазначеної нелінійності активного опору ротора дозволяє сформувати необхідний гармонічний склад миттєвої потужності, виходячи з кількості невідомих параметрів двигуна.

Для підтвердження працездатності та адекватності запропонованого способу ідентифікації ЕМП АД при живленні від електро cơханічних накопичувачів енергії були виконані експериментальні дослідження згідно блок-схеми (рис. 2). Для ідентифікації ЕМП АД, зазначених в табл. 2, використовувалися сигнали струму і напруги з п'яти ділянок тривалістю по 0,01 с кожен з використанням їхніх симетрій третього роду. Перед безпосередньо ідентифікацією параметрів двигуна в блоці обробки інформації ці сигнали профільовані від шумів і вищих гармонік.

Згідно з представленими даними (табл. 2), при ідентифікації ЕМП АД на п'яти ділянках сигналів напруги та струму отримані значення активного опору

Таблиця 2 – Результати ідентифікація ЕМП АД

t, с	Паспортні значення ЕМП АД типу МТФ 311-8				
	R_{20} , Ом	L_1 , Гн	L_μ , Гн	L'_2 , Гн	M_n , Нм
	1,2	$5,54 \cdot 10^{-3}$	0,052	$5,43 \cdot 10^{-3}$	257,255
	Помилки ідентифікації ЕМП АД відносно паспортних значень, %				Помилка розрахованого пускового моменту $M_n = 257,648$ відносно паспортного значення, %
	R_{20}	L_1	L_μ	L'_2	0,15
0÷0,01	0	0	0	0	
0,01÷0,02	0	6,97	0	2	
0,4÷0,41	0	6,97	0	2	
0,5÷0,51	0	7,94	0	3	
0,78÷0,79	0	2	0	2	

R'_2 ротора відповідають вихідним, а похибка визначення індуктивностей не перевищує 8%.

Висновки. Запропонований спосіб ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронного двигуна базується на засадах енергетичного методу і дозволяє сформувати необхідний гармонічний склад миттєвої потужності для випробувального режиму, що максимально наближений до реальних умов роботи електричної машини.

Для підвищення точності ідентифікації електромагнітних параметрів асинхронного двигуна запропоновано використовувати в якості джерела живлення електромеханічний накопичувач енергії. Це забезпечує отримання необхідного рівня тестових сигналів напруги та струму для умов, при яких ефект витіснення струму має найбільший вплив на зміну параметрів ротора двигуна.

Список литературы

1. Неисправности электрических машин и их проявление. <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/neispravnosti-elektricheskikh-mashin-i-ih-proyavlenie.html>. (дата обращения 15.02.2018).
2. Zagirnyak M., Rodkin D., Romashykhin Iu., Rudenko N., Chenchevoi V. Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the instantaneous power method. *Proceedings of the 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering*. Sandomierz, Poland, 2016. pp. 1 – 4. Doi: 10.1109/CPEE.2016.7738721.
3. Akagi H., Watanabe M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 379 p.
4. Шимони К. Теоретическая электротехника. Москва: Рипол Классик, 2013. 778 с.
5. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромеханическое поле. Москва: Издательство Юрайт, 2014. 317 с.
6. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. *Электрические машины и микромашины*. Москва: Альянс, 2016. 528 с.
7. Вольдек А. И., Попов В. В. *Электрические машины. Машины переменного тока*. СПб.: Питер, 2008. 350 с.
8. Копылов И. П. *Электрические машины*. Москва: Издательство Юрайт, 2012. 675 с.
9. Копылов И. П. *Математическое моделирование электрических машин*. Москва: Высшая школа, 2001. 327 с.
10. Руденко Н. А., Ромашихин Ю. В. Целесообразность учета эффекта вытеснения тока в роторе при определении параметров асинхронных двигателей. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: Зб. наук. пр. XIV Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених і спеціалістів 14–15 квітня 2016*. Кременчук: КрНУ, 2016. С. 120 – 121.

References (transliterated)

1. *Neispravnosti elektricheskikh mashin i ikh proyavleniye* [Malfunctions of electrical machines and their manifestation]. <https://leg.co.ua/info/elektricheskie-mashiny/neispravnosti-elektricheskikh-mashin-i-ih-proyavlenie.html>. (accessed 15.02.2018).
2. Zagirnyak M., Rodkin D., Romashykhin Iu., Rudenko N., Chenchevoi V. Identification of nonlinearities of induction motor equivalent circuits with the use of the instantaneous power method. *Proceedings of the 17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering*. Sandomierz, Poland, 2016. pp. 1 – 4. Doi: 10.1109/CPEE.2016.7738721.
3. Akagi H., Watanabe M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 379 p.
4. SHimoni K. *Teoreticheskaya elektrotehnika* [Theoretical electrical engineering]. Moskva: Ripol Klassik, 2013. 778 p.
5. Bessonov L. A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoye pole* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electromagnetic field]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2014. 317 p.
6. Bruskin D. E., Zorokhovich A. Ye., Khvostov V. S. *Elektricheskiye mashiny i mikromashiny* [Electric machines and micromachines]. Moscow: Al'yans, 2016. 528 p.
7. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Elektricheskiye mashiny. Mashiny peremennogo toka* [Electric machines. AC machines]. SPb.: Piter, 2008. 350 p.
8. Kopylov I. P. *Elektricheskiye mashiny* [Electric machines]. Moscow: Izdatel'stvo Yurayt, 2012. 675 p.
9. Kopylov I. P. *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Moskva: Vysshaya shkola, 2001. 327 p.
10. Rudenko N. A., Romashihin YU. V. *Celesoobraznost' ucheta effekta vytesneniya toka v rotore pri opredelenii parametrov asinhronnykh dvigatelej* [The feasibility of taking into account the effect of current displacement in the rotor when determining the parameters of induction motors.]. *Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modeliuвання ta optymizatsii: Zb. nauk. pr. KhIV Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. molodykh uchenykh i spetsialistiv 14–15 kvitnia 2016 r., Kremenчук* [Electromechanical and energy systems, modeling and optimization methods: Collection of works of the XVI International Conference of students and young researchers]. Kremenчук: KrNU, 2016. pp. 120 – 121.

Поступила 28.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Руденко Микита Андрійович (Руденко Никита Андреевич, Rudenko Nikita Andreevich) – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, асистент кафедри систем автоматичного управління і електроприводу; м. Кременчук, Україна; e-mail: nikita8rudenko@gmail.com

Зачепа Юрій Володимирович (Зачепа Юрий Владимирович, Iurii Zachepa) – кандидат технічних наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, доцент кафедри систем автоматичного управління та електроприводу; м. Кременчук, Україна; ORCID 0000-0003-4364-6904; e-mail: iurizachepa@gmail.com